

基于流域系统地貌信息熵的贺斯格 乌拉露天矿区稳定性评价

赵水霞^{1,2}, 王文君², 吴英杰², 刘艳萍², 李玮², 全强², 庄帅²

(1.中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学
观测研究站, 北京 100038; 2.水利部 牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: [目的] 开展露天矿区稳定性评价, 为矿区地貌重塑、生态环境修复及水土流失监测等提供技术支持。[方法] 以流域系统地貌信息熵为评价指标, 基于 ArcHydro 水文模型及流域自相似原理, 对露天矿区及周边未扰动区地貌形态稳定性进行评价, 探究矿区水土流失风险及其侵蚀强度。[结果] 受矿区剥离、采掘、运输及排弃等一系列工艺的影响, 内蒙古贺斯格乌拉露天矿区现状地貌信息熵多集中在 0.105~0.145, 流域地貌系统发育多为幼年期或壮年偏幼年期, 流域侵蚀风险较高; 原始地貌及未扰动区地貌信息熵多大于 0.40, 为稳定的壮年期或老年期, 地势平缓, 土壤侵蚀模数较小。[结论] 以贺斯格乌拉露天煤矿为例, 受矿区原始地貌、矿区开采顺序及排土场位置等影响, 水土流失风险呈现由南向北逐渐递增的趋势特征, 可以作为露天矿区地貌重塑及生态环境修复的依据。

关键词: 地貌信息熵; 矿区; 流域系统; 侵蚀风险; 地貌重塑

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2023)05-0141-07

中图分类号: S157.9, P933

文献参数: 赵水霞, 王文君, 吴英杰, 等. 基于流域系统地貌信息熵的贺斯格乌拉露天矿区稳定性评价[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 141-147. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.017; Zhao Shuixia, Wang Wenjun, Wu Yingjie, et al. Stability assessment of Hesigewula open-pit coal mine based on geomorphic information entropy of watershed system [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 141-147.

Stability Assessment of Hesigewula Open-pit Coal Mine Based on Geomorphic Information Entropy of Watershed System

Zhao Shuixia^{1,2}, Wang Wenjun², Wu Yingjie², Liu Yanping², Li Wei², Quan Qiang², Zhuang Shuai²

(1.Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research Station,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2.Institute of

Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China)

Abstract: [Objective] The stability evaluation of an open-pit mining area was carried out in order to provide technical support for landform remodeling, ecological environment restoration, and soil erosion monitoring in a mining area. [Methods] The ArcHydro hydrological model and watershed self-similarity principle were used in this study. The stability of geomorphic forms in an open-pit mining area and in the surrounding undisturbed area was evaluated using the geomorphic information entropy evaluation index. The risk of soil erosion and erosion intensity in the mine area were also determined. [Results] The geomorphic information entropy of the Hesigewula open-pit coal mine area in Inner Mongolia was affected by a series of processes such as stripping, mining, transportation, and disposal, and was mostly concentrated in the index value range of 0.105—0.145. The geomorphic system development of the watershed in the mining area was mostly

收稿日期: 2023-02-15

修回日期: 2023-03-16

资助项目: 内蒙古自治区科技重大专项“内蒙古典型矿区生态修复技术集成与示范”(2020ZD0020); 内蒙古自治区科技计划项目“基于物联网和无人机遥感技术的荒漠草原生态系统监测研究与示范”(2021GG0050); 中国水科院“五大人才”创新团队项目(MK0145B022021)

第一作者: 赵水霞(1992—), 女(汉族), 内蒙古自治区鄂尔多斯市人, 博士, 高级工程师, 主要从事生态水文及水旱灾害研究。Email: zhaosx@iwhr.com.

通信作者: 王文君(1978—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事生态水文及水旱灾害研究。Email: wangwj@iwhr.com.

in the juvenile stage or middle-aged to juvenile stage. The risk of watershed erosion was high. Most of the information entropy of the original landform and undisturbed area was greater than 0.40, where the watershed geomorphic system was stable and strong, with flat terrain and small soil erosion modulus. [Conclusion] The risk of soil erosion gradually increased from south to north at the Hesigewula open-pit mine due to the original landform of the mining area, the mining sequence, and the location of the dump site. The results of this study can be used as the basis for landform reconstruction and ecological environment restoration of similar open-pit coal mines.

Keywords: geomorphic information entropy; mining area; watershed system; erosion risk; geomorphic reconstruction

露天矿区开采直接破坏了地表土层及原有植被,对区域景观及生态环境造成了严重影响,进而引发水土流失、地表塌陷及土壤沙化等一系列突出问题^[1-2]。随着国家对绿色矿山建设的不断要求,从地貌重塑、土壤重构及植被重建等方面进行矿区生态修复是新时代下矿区可持续发展的必然过程。地貌重塑是土地复垦及生态修复的重要环节,亦是矿区进行土壤重构及植被重建的基础。以流域系统地貌信息熵为参照依据,评估矿区流域系统地貌稳定性及其发育状态,进而研判区域水土流失风险,对矿区制定地貌重塑方案具有重要的指导意义。

国外对矿区土地复垦的研究起步较早,其地貌重塑方案强调要近似原始地形,不仅要考虑地形各构成要素间的相互融合,还要兼顾复垦地形与周边自然景观的协调性^[3-5]。20 世纪 90 年代,美国煤矿公司将流域地貌学理论及恢复生态学理论运用于露天煤矿地貌重塑中,利用 GeoFluv 模型对矿区重塑地貌水系进行设计,从而取得有别于传统地貌重塑的生态环境^[6-7]。中国土地复垦的研究起步较晚,现有的地貌重塑控制标准主要集中在坡度、地形平整度及配套设施等方面的规定,对露天矿区近自然地貌重塑的实践及河流水系紊乱等造成的水土流失风险尚处于探索阶段^[4,8-9]。地貌系统是一个开放的系统,其发育过程与热传导过程相似,受地貌内外营力的共同作用。1899 年,戴维斯提出地貌循环理论,认为平坦地面在构造营力作用下被侵蚀破坏,依次经历幼年、壮年及老年 3 个发育阶段,最后发展为地势起伏不大且变化缓慢的稳定期^[10]。50 年代,美国理论地貌学家斯特拉勒(Strahler A.N.)将戴维斯的地貌发育模型进行量化,提出了侵蚀流域的面积—高程分析法^[11],若斯特拉勒积分为已知,则侵蚀流域的熵值(地貌信息熵)便可以求得^[12],其熵值是区域稳定性的一种判别依据,更是水土流失及自然灾害强弱的一种量化指标,该方法在矿区流域地貌重塑后评价中的应用也得到了验证^[13-17]。

本研究以内蒙古贺斯格乌拉露天矿区为研究区,应用流域系统地貌信息熵理论,定量分析矿区流域地

貌发育状态,进而研判区域水土流失风险及其侵蚀强度;探究矿区流域近自然地貌重塑参照区位置及范围,以期对矿区地貌重塑提供可靠科学依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

贺斯格乌拉矿区位于内蒙古自治区锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗,属于乌拉盖开发区管辖范围,地理坐标为 119°06′00″—119°14′25″E,45°54′00″—46°22′57″N。矿区地表境界东西平均宽 2.9 km,南北平均长 6.0 km,面积约 17.5 km²。矿区自 2009 年 5 月开始大规模建设并局部投入生产,根据露天矿区地形、规模、煤层赋存条件等信息,矿区沿向斜轴分为 2 个采区,开采顺序为首采区—二采区。其中,首采区位于西北位置,二采区位于东南位置,开采深度为 30~450 m,包含北面、东面及南面 3 个排土场^[18]。矿区地处大兴安岭南段脊部,地貌类型为缓坡丘陵,境界内地势西高东低,土壤类型为草甸土和沼泽土,植被类型为草甸草原;气候属温带大陆性干旱气候,年平均气温 0.7 ℃,年平均降水量 323.67 mm,年平均蒸发量 1 542.75 mm,年平均风速 4.5 m/s,最大冻土深 3.6 m,无霜期 115 d。研究区属于全国土壤侵蚀类型区划中的“三北”戈壁沙漠及沙地风沙区,水土流失类型为以风力侵蚀为主的水风复合侵蚀,风力侵蚀模数为 500 t/(km²·a),水力侵蚀模数为 200 t/(km²·a),容许土壤流失量 200 t/(km²·a)。

1.2 数据来源与预处理

本研究采用的数据为矿区 2021 年 6 月 1:10 000 地形图矢量化后生成的 DEM 数据,高程点 1 262 个。矿区参照区为 2009 年建矿前 30 m DEM 数字高程数据。依据地貌流域系统自相似原理及师法自然生态修复理论^[19-20],分别选取建矿前矿区范围及北面周边邻近未扰动区两个位置作为地貌信息熵评估及地貌重塑参照区选取的评价范围,在 ArcGIS 水文分析模块中采用单流向 D8 算法对 30 m DEM 高程数据下矿区及未扰动区的河网信息进行提取,通过建立批量处理模型,对 DEM 高程数据进行填注、

流向、流量及河网矢量化等一系列处理,获取不同累积栅格数量下的河网信息,累积栅格区间为 50~2 000,增量为 50。采用均值变点法率定河网水系划分阈值,统计不同累积栅格下河网总长度及沟道密度,其中,沟道密度为区域内沟道总长度与面积的比值,通过拟合累积栅格数量与沟道密度曲线,获取河网密度区域稳定划分阈值。对 2021 年矿区实测 DEM 数据进行相同阈值下河网水系划分,进而基于地貌信息熵理论对现状矿区及两个参照区地貌发育稳定性进行评判,通过率定水土流失风险等级,评估矿区流域地貌稳定性。

1.3 数据分析方法

1.3.1 均值变点法 均值变点法是统计学中对非线性数据进行处理的数理统计方法,对于存在唯一变点的检验最为有效^[20],本研究采用该方法计算矿区流域河网水系形成的最佳累积栅格阈值。

设有序数组 X_i ,令 $i=1,2\cdots n$ (n 为总样本数),以 X_i 点为分界点将样本分为 2 段: $X_1, X_2\cdots X_{i-1}$ 和 $X_i, X_{i+1}\cdots X_n$,分别计算 2 段样本的算术平均值 $\overline{X_{i_1}}, \overline{X_{i_2}}$ 及总样本均值 \overline{X} ,并计算样本总方差 δ 及局部样本统计量 δ_i 。

$$\delta = \sum_{i=1}^n (X_i - \overline{X})^2 \quad (1)$$

$$\delta_i = \sum_{t_1=1}^{i-1} (X_{t_1} - \overline{X_{i_1}})^2 + \sum_{t_2=i}^n (X_{t_2} - \overline{X_{i_2}})^2 \quad (2)$$

式中:下脚标 $t_1=1,2\cdots i-1$; $t_2=i, i+1\cdots n$;当 δ 与 δ_i 的差值达到最大时,其对应的累积栅格数量即为矿区流域水系河网提取的最佳阈值。

1.3.2 地貌信息熵 地貌信息熵理论是艾南山等结合 Stahler 面积—高程分析法和地貌循环理论推导得出的,其熵值用于表征地貌的侵蚀发育程度,计算公式为^[12]:

$$H = S - \ln S - 1 = \int_0^1 F(x) dx - \ln \left[\int_0^1 F(x) dx \right] - 1 \quad (3)$$

式中: H 为地貌信息熵; S 为面积—高程积分值; $F(x)$ 为面积—高程积分拟合函数。其中, $F(x)$ 为基于流域内不同高程差值的垂直投影面积与高程差值标准化后的拟合函数,分别记为 X_i 和 Y_i ,拟合曲线及横纵坐标轴之间的面积即为面积—高程积分值。

X_i 和 Y_i 计算公式分别为:

$$X_i = A_i / A \quad (4)$$

式中: A_i 为高程大于 i 的区域在基准面上的垂直投影面积; A 为整个流域在基准面上的投影总面积。

$$Y_i = h_i / h \quad (5)$$

式中: h_i 为流域基点(最低点)到高程 i 的差值; h 是

流域最高点与基点的差值。

地貌信息熵越小,表明流域侵蚀下切越严重,侵蚀发育状态处于幼年期;地貌信息熵越大,表明流域侵蚀越稳定,侵蚀发育状态处于老年期,划分标准见表 1^[11,13-15]。

表 1 基于地貌信息熵的流域系统发育侵蚀程度划分
Table 1 Developing erosion degree division of watershed system based on geomorphic information entropy

地貌信息熵范围	流域系统发育侵蚀程度
$H < 0.111$	幼年期
$0.111 \leq H \leq 0.400$	壮年期
$H > 0.400$	老年期

本研究通过对 30 m DEM 数据下矿区及未扰动区两个参照区,2021 年矿区实测地形 DEM 数据下获取的总流域及各级子流域地貌信息熵进行分析,判别矿区各级子流域的侵蚀程度。

2 结果与分析

2.1 基于均值变点法的矿区流域水系提取阈值确定

为确定矿区流域中永久沟道,本研究采用河网密度法及均值变点法对不同累积栅格下水系提取阈值进行率定。选取 2009 年矿区未被扰动前 30 m DEM 数据经空间和水文分析后得到的河网信息,统计并拟合累积栅格在 50~2 000 范围内的河网密度与累积栅格数曲线(如图 1a 所示)。可以看出,两者呈显著的幂函数关系,沟道密度随累积栅格数量的增加呈下降趋势,累积栅格大于 500 时,沟道密度趋于平缓;图 1b 为基于均值变点法的累积栅格数与样本均值差曲线,率定矿区累积栅格数量为 250 时水系提取阈值最佳。

图 2 为最佳累积栅格 250 阈值下获取的矿区参照区、北面未扰动参照区及 2021 年现状开矿后水系;可以看出,矿区开采对区域流域水系、坡面及沟道的稳定性等产生巨大破坏,对开采区水土流失及生态环境产生较大影响。

2.2 基于流域系统的矿区及参照区地貌信息熵

对矿区未被扰动前及开采后地貌流域系统水系进行分级,并对各级子流域面积—高程曲线进行对数方程、二次及三次等多项式拟合,选取拟合效果较好的三次函数方程进行信息熵的计算(如图 3—5 所示),为矿区及 2 个参照区 I 级子流域面积—高程拟合曲线及其地貌信息熵。矿区在未被扰动前水系发育,共包含 6 个 I 级子流域,信息熵集中在 0.180~0.558 范围,主沟道南面地貌特征较稳定。矿区北面未扰动参照区共包含了 4 个 I 子流域,地貌信息熵范围为 0.415~0.704,主沟道西面地貌水系特征较稳定。

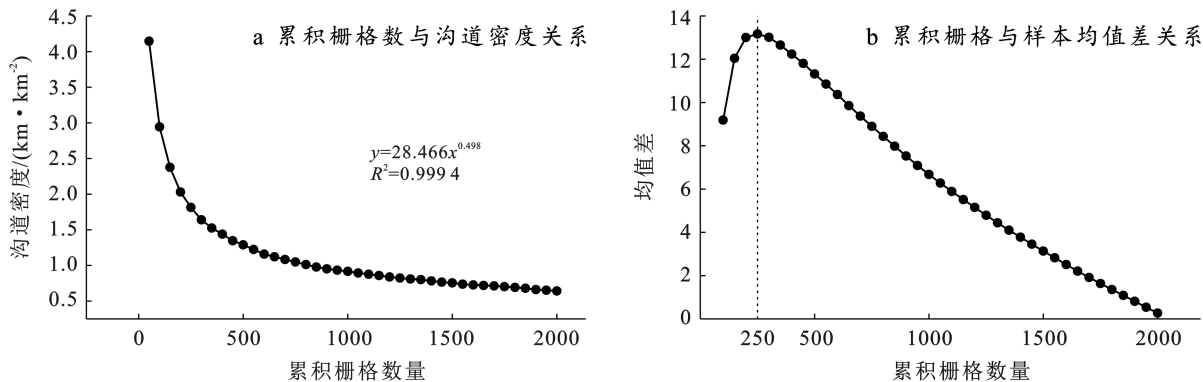


图 1 基于均值变点法的矿区流域水系阈值分析

Fig.1 Threshold analysis of river system in mining area based on mean change point method

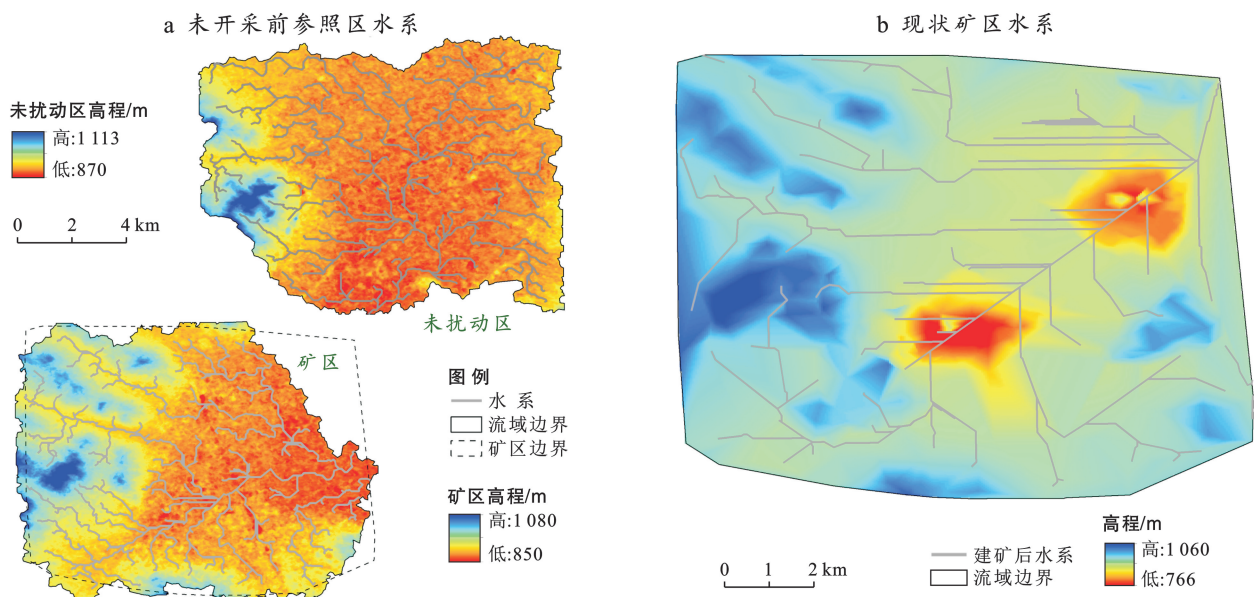


图 2 现状矿区及参照区水系特征

Fig.2 Drainage characteristics of current mining area and reference areas

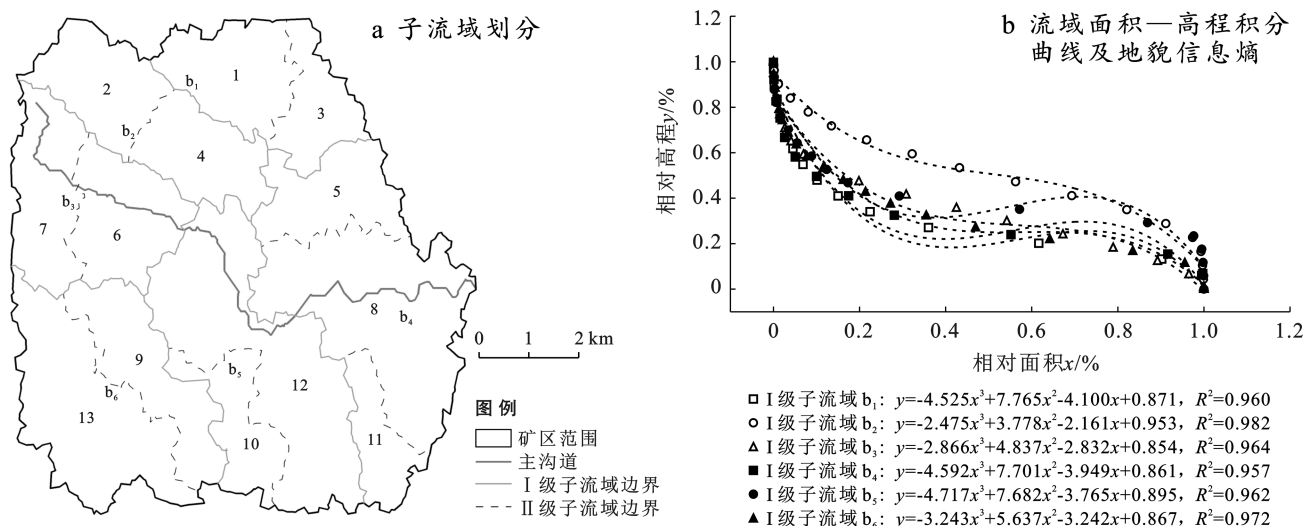
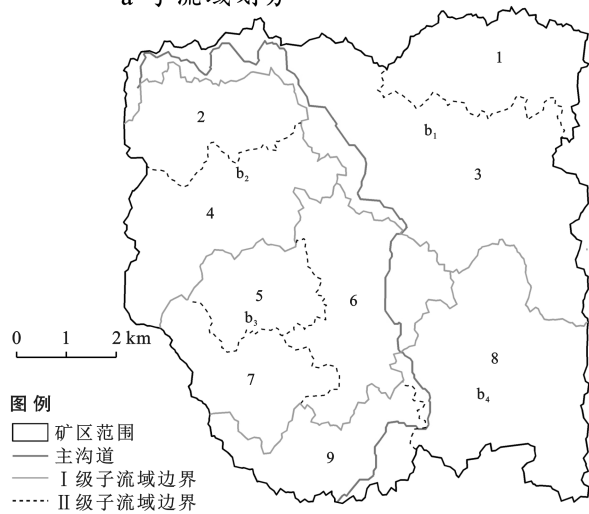


图 3 矿区未扰动前子流域划分及地貌信息熵

Fig.3 Sub-watershed division and geomorphic information entropy of undamaged mining area

a 子流域划分



b 流域面积—高程积分曲线及地貌信息熵

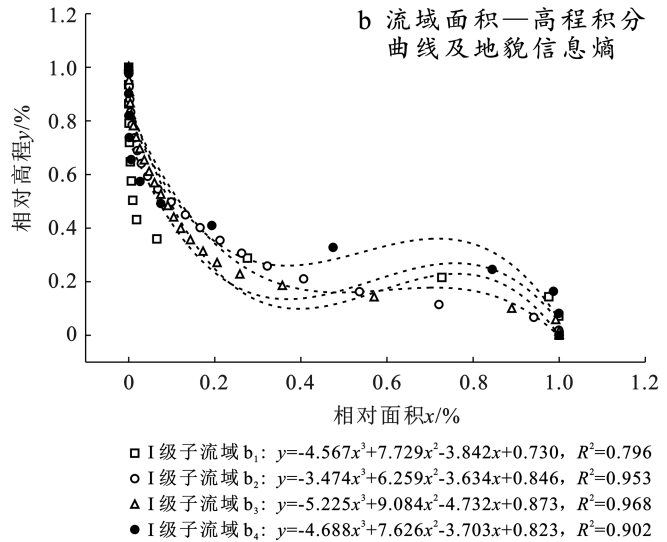
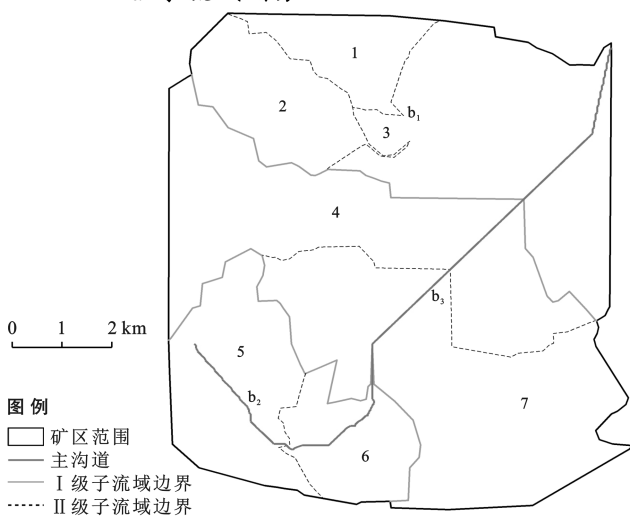


图 4 北面未扰动参照区子流域划分及地貌信息熵

Fig.4 Sub-watershed division and geomorphic information entropy of northern undisturbed reference area

a 子流域划分



b 流域面积—高程积分曲线及地貌信息熵

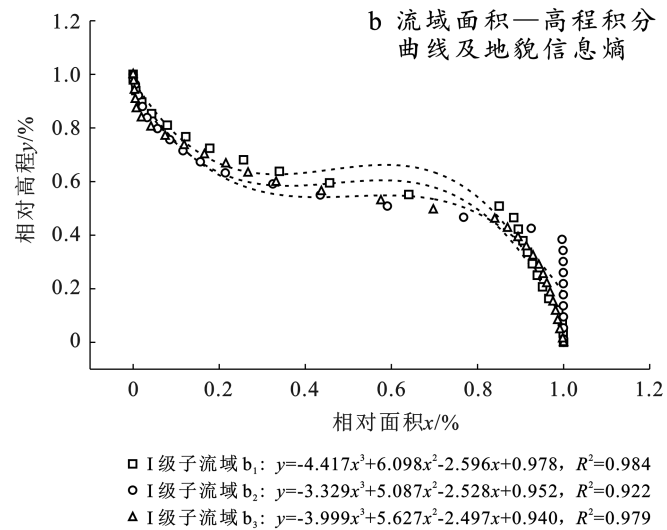


图 5 矿区现状子流域划分及地貌信息熵

Fig.5 Sub-watershed division and geomorphic information entropy of the current mining area

矿区开采改变了区域地貌特征,进而对流域水系及水流流向产生影响,现状矿区仅包含了 3 个 I 级子流域,且各 I 级子流域内包含的 II 级子流域控制面积较大,分布较散,地貌信息熵集中在 0.105~0.145 范围,以主沟道为分界,矿区地貌侵蚀发育程度南面较北面稳定。

2.3 矿区水土流失风险分析及地貌重塑参照区稳定性评价

基于地貌信息熵结果综合研判本研究区地貌发育特征及侵蚀程度,以现有信息熵划分标准为依据^[12-13],结合本研究区实际情况,进一步细化流域发育程度及水土流失风险等级划分范围,结果见表 2。分析表 2 和现状矿区及矿区未扰动前 2 个参照

区的 I 级子流域地貌信息熵结果,可以看出,矿区在未被扰动前,矿区范围内除个别 I 级子流域地表起伏较大,地貌发育属于壮年偏幼年期,存在一定的侵蚀风险外,研究区流域地貌发育程度多属于老年期,地貌特征稳定且水土流失风险极低,沟槽稳定。矿区开采后,其流域系统地貌发育程度均处于幼年期或壮年偏幼年期,其中,现状矿区 I 级子流域 1 地貌特征极其不稳定,侵蚀强烈,水土流失风险等级为极高风险。

矿区在未被扰动前,流域地貌稳定性较好,其相关的水文地理参数(沟道密度、弯曲度、出水口坡度等)是后期进行扰动后地貌重塑的重要参考指标。为进一步研判矿区地貌重塑参照区范围,支撑现状矿区

近自然地貌重塑方案制订,本研究以流域水系分析结果为基础,利用 ArcHydro 水文模型对矿区未扰动前两个参照区的水文地貌参数进行提取,对比评估参照区流域系统地貌相对稳定性,结果见表 3。其中,沟道密度主要用于衡量陆地表面中沟道的数量,沟道密度越大,水系越发达;沟道弯曲度是沟道在下游方向

上的弯曲程度,其影响陆地水流的冲刷速度;分水岭到沟道起点距离是确定沟道起点及流域范围内山脊线的重要指标^[16]。对比两个参照区水文地貌参数及流域水系划分结果,矿区未扰动前北面参照区流域系统水系更发达,稳定性更好,水土侵蚀风险率较低,可为矿区近自然地貌重塑模拟提供重要参考。

表 2 基于流域系统地貌信息熵的地貌发育程度及水土流失风险细化

Table 2 Refinement of geomorphic development degree and soil erosion risk based on geomorphic information entropy

地貌信息熵范围	流域系统地貌发育程度	特 征	风险等级
$H < 0.111$	幼年期	地表起伏大,水系处于扩展和分支阶段,坡度变形迅速,地貌不稳定,侵蚀强烈	极高
$0.111 \leq H \leq 0.200$	壮年偏幼年期	水系处于扩展末期,地形坡度基本形成,地表起伏较大,侵蚀减弱	高
$0.200 < H \leq 0.300$	壮年期	地表坡度较稳定,侵蚀明显减弱	中等
$0.300 < H \leq 0.400$	壮年偏老年期	地表起伏变化小,侵蚀缓和,地貌较稳定	低
$H > 0.400$	老年期	以平原为主,流域侵蚀微弱,沟槽稳定	极低

表 3 矿区未扰动前两个参照区水文地貌参数信息

Table 3 Hydro-geomorphic parameters of two reference areas before mining area disturbed

参照区名称	水文地貌参数信息				
	主沟道长度/km	沟道密度/($\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$)	沟道弯曲度	基准面高程/m	分水岭到沟道起点距离/m
矿 区	14.603	1.739	1.515	850	369.128
北面未扰动区	18.232	1.744	1.933	870	426.523

3 讨论

分析矿区流域地貌发育程度及地貌重塑参照区流域系统稳定性是露天矿区进行近自然地貌重塑及生态环境修复的重要内容。本研究以内蒙古贺斯格乌拉露天矿区为例,基于地貌信息熵对现状矿区、参照区系统稳定性及水土流失风险等进行综合评估是非常必要的。以矿区流域系统为评价指标,依据水系稳定性及连通性,分析矿区剥离表土及松散堆积物在水力及风力侵蚀作用下的水土流失风险,判定矿区水土流失主要防治区集中在排土场及采掘场,水土流失风险及强度呈现:矿区北面>东面>南面的特点,其结果与矿区采排过程及排土场运行时间顺序相吻合。矿区开采前流域地貌稳定性及土壤质地等特征是影响采矿后地貌侵蚀风险的重要指标之一^[19-20],以地貌信息熵作为矿区地貌演化的量化评价指标,研判矿区开采后北部 I 级子流域 2 地貌信息熵减小,侵蚀风险增大的另一个原因与其原始地貌本身处于幼年期,构造运动活跃,存在强烈侵蚀风险有关。

基于流域地貌学及其近自然相似原理的重塑地貌能更好地适应当地水资源和气候特征,更好地与自然景观相融合且具有较强的区域抗水蚀能力^[21],从流域地貌发育程度及水土流失地形因子出发,对侵蚀风险进行细化,为水土保持方案的提出奠定了理论基

础和技术支撑。流域水系沟道密度、弯曲度及倾斜度等指标是影响区域稳定及抗水土流失风险的重要指标,受矿区原始地貌构造活跃且存在地形起伏较大区域等影响,本研究推荐选用矿区未扰动前北部地质构造稳定区为近自然地貌重塑参照区是合理且可行的。

4 结论

(1) 贺斯格乌拉露天矿区流域系统河网水系的累积栅格最佳阈值为 250,对矿区流域系统地貌信息熵的量化计算有力地支撑了区域水土流失风险评估;

(2) 受矿区采排工艺的影响,研究区地貌信息熵显著降低,地貌发育呈不稳定且强烈侵蚀的幼年发育期,水土流失风险较高,空间上整体呈现从北向南递减的特征;

(3) 以流域地貌学及近自然相似理论为基础,研判选取的矿区未扰动前北面参照区流域地貌水系特征是矿区进行近自然地貌重塑的重要参照依据,对矿区生态环境修复具有重要意义。

致谢:感谢内蒙古蒙草矿山科技有限责任公司提供的 2021 年矿区 1:10 000 地形图及矿区相关资料。

[参 考 文 献]

[1] 雷少刚,张周爱,陈航,等.草原煤电基地景观生态恢复技

- 术策略[J].煤炭学报,2019,44(12):3662-3669.
- [2] 徐启胜,王金满,时文婷.大型露天煤矿区景观格局变化对水土流失的影响:以山西平朔矿区为例[J].中国土地科学,2022,36(4):96-106.
- [3] Palmer M A, Filoso S. Restoration of ecosystem services for environmental markets [J]. Science, 2009, 325(5940):575-576.
- [4] 荣颖,胡振琪,付艳华,等.中美草原区露天煤矿土地复垦技术对比案例研究[J].中国矿业,2017,26(1):55-59.
- [5] Hancock G R, Loch R J, Willgoose G R. The design of post-mining landscapes using geomorphic principles [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2003,28(10):1097-1110.
- [6] 张成梁,B.Larry Li.美国煤矿废弃地的生态修复[J].生态学报,2011,31(1):276-285.
- [7] Sears A E, Bise C J, Quaranta J D, et al. Field and modeling study for stream mitigation on surface mine sites in West Virginia [J]. Mining Engineering, 2014,66(5):48-53.
- [8] 李晶,马天跃,闫萧萧,等.中美土地复垦质量控制标准对比研究:以草原露天矿区为例[J].矿业科学学报,2022,7(4):446-455.
- [9] 刘新华,张晓萍,杨勤科,等.不同尺度下影响水土流失地形因子指标的分析与选取[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2004,32(6):107-111.
- [10] Davis W M. The geographical cycle [J]. The Geographical Journal, 1899,14(5):481.
- [11] Strahler A N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography [J]. Geological Society of America Bulletin, 1952,63(11):1117.
- [12] 艾南山,岳天祥.再论流域系统的信息熵[J].水土保持学报,1988,2(4):1-9.
- [13] 杨翠霞,赵廷宁,谢宝元,等.基于小流域自然形态的废弃矿区地形重塑模拟[J].农业工程学报,2014,30(1):236-244.
- [14] 吕春娟,白中科,赵景逵.矿区土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].水土保持学报,2003,17(6):85-88.
- [15] Magesh N S, Chandrasekar N, Soundranayagam J P. Morphometric evaluation of Papanasam and Manimuthar watersheds, parts of Western Ghats, Tirunelveli district, Tamil Nadu, India: a GIS approach [J]. Environmental Earth Sciences, 2011,64(2):373-381.
- [16] 白中科,周伟,王金满,等.再论矿区生态系统恢复重建[J].中国土地科学,2018,32(11):1-9.
- [17] 殷宗敏,刘万青.基于地形剖面线的陕北黄土高原地貌信息熵差分析[J].水土保持通报,2017,37(1):166-172.
- [18] 杨令杰,沈伟,王家栋.贺斯格乌拉露天煤矿采区划分及开采方案研究[J].露天采矿技术,2016,31(4):49-52.
- [19] 夏嘉南,李根生,卞正富,等.露天矿内排土场近自然地貌重塑研究:以新疆黑山露天矿为例[J].煤炭科学技术,2022,50(11):213-221.
- [20] 张莉,王金满,刘涛.露天煤矿区受损土地景观重塑与再造的研究进展[J].地球科学进展,2016,31(12):1235-1246.
- [21] 阎仲康,曹银贵,李志涛,等.内蒙古东部草原区矿山生态修复研究:关键技术与减碳路径[J].农业资源与环境学报,2023,40(3):570-582.

(上接第 140 页)

- [34] Zhu Yiheng, Yang Shan, Lin Jinping, et al. Spatial and temporal evolutionary characteristics and its influencing factors of economic spatial polarization in the Yangtze River Delta region [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(12):6997.
- [35] Nefedova T G, Starikova A V. Migrations as a way of population adaptation to polarization of space at the center of Russia [J]. Sotsiologicheskie Issledovaniya, 2020:24-38.
- [36] 赵磊,方成,丁焯.浙江省县域经济发展差异与空间极化研究[J].经济地理,2014,34(7):36-43.
- [37] Lin Chenjie, Hu Yueming, Liu Zhenhua, et al. Estimation of cultivated land quality based on soil hyperspectral data [J]. Agriculture, 2022,12(1):93.
- [38] 张新乐,钱蕾,鲍依临,等.黑土区田块尺度耕地质量遥感监测与评价[J].土壤通报,2020,51(6):1303-1312.
- [39] Li Yinshuai, Chang Chunyan, Wang Zhuoran, et al. Upscaling remote sensing inversion model of wheat field cultivated land quality in the Huang-Huai-Hai agricultural region, China [J]. Remote Sensing, 2021,13(24):5095.
- [40] 李奕志,李立强,孔祥斌,等.美国国家资源清单及其对中国耕地质量动态监测的启示[J].中国土地科学,2014,28(7):82-89.
- [41] 田惠文,张欣欣,毕如田,等.非均匀网格环境下基于耕地质量与集中连片度的基本农田划定[J].农业工程学报,2020,36(3):254-262.
- [42] 李子杰,高沪宁,丁琪珣,等.基于 Moran's I 的安徽省太湖县耕地质量时空格局分析[J].水土保持通报,2021,41(3):350-356.
- [43] 高建岗,黄锐.基于耕地质量指数和空间自相关的苏南地区耕地保护分区[J].水土保持研究,2019,26(3):213-218.